

金属膜对单介质板太赫兹波导传输特性的影响

刘佳敏¹, 梁华伟^{1,2}, 张 敏^{1,2}, 苏 红^{1,2}

(1. 深圳大学电子科学与技术学院, 广东 深圳 518060;

2. 深圳大学激光工程深圳重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘 要:理论分析了对称金属薄膜镀层对厚单介质板太赫兹波导 TM 模传输特性的影响,发现镀膜前后 TM 模损耗相差巨大,并且随太赫兹频率的增加 TM 模损耗差异会更大。对低损耗厚单介质板,金属膜对 TM 模损耗的影响不可忽视。进一步研究了镀膜对 TM 模模场分布的影响,发现镀膜前后厚单介质板内 TM 模模场分布显著不同。

关键词:太赫兹波导;单介质板;传输特性;损耗;模场

中图分类号:0441 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2014.11.017

Effect of metal film on transmission characteristics of single-dielectric-slab THz waveguide

LIU Jia-min¹, LIANG Hua-wei^{1,2}, ZHANG Min^{1,2}, SU Hong^{1,2}

(1. College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

2. Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: The effect of a symmetrical metal film on the transmission characteristics of TM mode in the thicker single-dielectric-slab THz waveguide is analyzed theoretically. It is found that the coating of metal film results in huge difference in the attenuation coefficients of TM mode, and attenuation difference of TM mode increases with the increase of the THz frequency. For a thicker single-dielectric-slab THz waveguide with low absorption loss, the influence of metal film on the loss of TM mode can't be ignored. The influence of metal film on the mode field distribution of TM mode is further studied, and it is found that the mode field distribution of TM mode in the thicker dielectric slab is varied significantly after coating.

Key words: terahertz waveguide; single-dielectric-slab; transmission characteristics; attenuation coefficient; mode field

1 引 言

太赫兹 (THz) 波通常是指频率在 0.1 ~ 10 THz 范围内的电磁波,其波段位于微波和红外光之间^[1]。由于在电磁波谱中太赫兹波所处的位置特殊,它有很多优越的特性,在学术上、应用上都有非常重要的价值,因此世界各国许多机构都对它极大地关注^[2-3]。目前国际上对太赫兹波的研究主要集中在太赫兹传输、辐射源^[4]、探测^[5-6]、传感、成像^[7]等几个方面。在传输方面,由于水分的吸收,

太赫兹光束的发散,在自由空间中传输时损耗太大,因此太赫兹波只能在一定的波导系统中才能进行远距离传输^[8-9]。国际上已对多种不同的太赫兹波导进行了报道和研究,如太赫兹金属波导、光子晶体波导^[10]、光子晶体光纤、聚合物波导、塑料带状波导和蓝宝石光纤等^[11]。由于金属的高欧姆损耗和介质

作者简介:刘佳敏(1988 -),男,硕士研究生,主要从事 THz 波导方面的研究工作。E-mail:2120160104@email.szu.edu.cn

收稿日期:2014-03-28;**修订日期:**2014-04-25

的高吸收损耗,低损耗太赫兹波导的研究一直受到限制。近年来单介质板太赫兹波导的作用非常活跃,如作极其薄的太赫兹导向介质^[12],硅单介质板^[13-14],用单介质板对太赫兹电场实现定量相位对比成像^[15],在平行金属板中的二维介质板用于滤波^[16],构成低折射率不连续太赫兹波导^[17]等。但金属对单介质板的传输特性影响还缺乏深入的理论研究。

本文详细研究了金属薄膜对厚(相对太赫兹波长)单介质板 TM 模的损耗和模场的影响。我们发现,低吸收损耗厚单介质板表面的金属薄膜对其 TM 模损耗有巨大的影响。在模场分布方面,发现金属薄膜的存在会使厚单介质板内 TM 模模场发生显著的变化。

$$H_y(x) = \begin{cases} A \cos(h_1 x) & |x| \leq a \\ A \left[\cos(h_1 a) \cosh_2(|x| - a) - \frac{h_1 \varepsilon_2}{h_2 \varepsilon_1} \sin(h_1 a) \sinh_2(|x| - a) \right] & a \leq |x| \leq b \\ A \left[\cos(h_1 a) \cosh_2(b - a) - \frac{h_1 \varepsilon_2}{h_2 \varepsilon_1} \sin(h_1 a) \sinh_2(b - a) \right] e^{-h_3(1|x| - b)} & |x| \geq b \end{cases} \quad (1)$$

其中, A 是与模式能量相关的系数, $h_1 = (n_1^2 k_0^2 - \beta^2)^{1/2}$, $h_2 = (n_2^2 k_0^2 - \beta^2)^{1/2}$, $h_3 = (\beta^2 - n_3^2 k_0^2)^{1/2}$; n_1, n_2, n_3 分别为介质板、金属薄膜和空气在 THz 波段的折射率, $\varepsilon_1 = n_1^2, \varepsilon_2 = n_2^2, \varepsilon_3 = n_3^2$ 为对应的相对介电常数; k_0 为真空中的波矢; $\beta = \beta_1 - i \cdot \alpha$ 为导模传播常数,由实部和虚部构成,其实部为相位传播常数 β_1 与模式有效折射率 $n_{eff} = \beta_1/k_0$ 有关,其虚部为模式损耗系数 α 。

TM 模偶模的色散方程为^[18]:

$$h_1 a = \tan^{-1} \left[\frac{1 - \frac{h_2 \varepsilon_3}{h_3 \varepsilon_2} \tanh_2(b - a)}{\frac{h_1 \varepsilon_3}{h_3 \varepsilon_1} + \frac{h_1 \varepsilon_2}{h_2 \varepsilon_1} \tanh_2(b - a)} \right] \quad (2)$$

利用数值计算上述色散方程可以求出该波导偶模的传播常数 β , 从而得出模式的损耗系数 α 。进一步,根据传播常数和式(1),可以求出该模式的模场分布。

3 金属薄膜对太赫兹波 TM 模在厚单介质板内传输特性的影响

研究的单介质板的材料为硅,在其两侧镀金属铜膜,硅和铜的折射率分别为 $n_1 = \sqrt{\varepsilon_1}$, $n_2 = \sqrt{\varepsilon_2}$ 。它们的相对介电常数 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 可以通过如下的德鲁德公式算出:

$$\varepsilon = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - i\omega\omega_\tau} \quad (3)$$

2 单介质板镀对称金属薄膜波导 TM 模特征方程

单介质板镀对称金属薄膜波导结构如图 1 所示, y 方向的波导宽度足够大, TM 模沿 z 方向传输, $2a$ 为介质板厚度,其两侧为金属膜,膜厚均为 $t = b - a$, TM 模偶模的模场分布如式(1)所示^[18]:

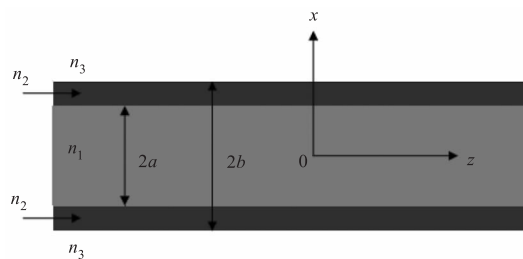


图 1 单介质板镀对称金属膜波导结构

式中, ε_∞ 是高频介电常数,对于硅为 $\varepsilon_\infty = 11.7$,铜在 THz 波段的高频介电常数可以忽略, ω_p 为等离子体振荡频率, ω_τ 为载流子相位相干性的衰减系数, ω 为太赫兹波角频率。 ω_p 的表达式如下:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{Ne^2}{m^* \varepsilon_0}} \quad (4)$$

式中, N 为自由载流子密度,对硅来说与硅掺杂程度有关, e 为电子电量, m^* 为电子有效质量, ε_0 为真空介电常数。采用掺杂程度很低的硅,取其参数^[19]为: $\omega_p = 0.01 \times 10^{12} \text{ Hz}$, $\omega_\tau = 0.67 \times 10^{12} \text{ Hz}$;铜参数^[20]为: $\omega_p = 1.1234 \times 10^{16} \text{ Hz}$, $\omega_\tau = 1.3798 \times 10^{13} \text{ Hz}$ 。金属薄膜外为空气, $n_3 = \sqrt{\varepsilon_3} = 1$ 。

3.1 金属薄膜对厚单介质板 TM 模损耗 α 的巨大影响

研究 1 mm 厚的硅板,太赫兹波频率为 1 THz,对应波长 $\lambda = 0.3 \text{ mm}$ 。通过数值计算式(2)得到了 TM 模损耗 α 随厚单介质板两侧对称金属膜厚度的变化规律,如图 2 所示。

由图 2(a)可知厚单介质板只要沾上极薄的金属薄膜其 TM 模损耗 α 就会突变,并且 α 会随着膜厚的增加而减小,由图 2(b)可知在膜厚约为 120 nm 时 α 有一最低值 0.0168 cm^{-1} ,最终 α 趋于一定值 0.0171 cm^{-1} 。 α 值都很大,在膜厚为 2 nm 时 α 为 0.661 cm^{-1} ,而不镀膜时 1 THz 处这种掺杂程度的

厚硅板 TM 模损耗为 $0.814 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ (这个损耗在硅板厚度与太赫兹波长之比 $2a/\lambda$ 大于 0.33 的范围变化很小)。在镀膜厚度从 2 nm 到 320 nm 的变化范围内损耗与不镀膜时的 TM 模损耗之比从 81122 倍到 2063 倍变化。值得指出的是厚单介质板未镀金属膜时模式有效折射率等于硅折射率,这说明厚单介质板太赫兹波导导光机制为全内反射,在板外只存在倏逝波。

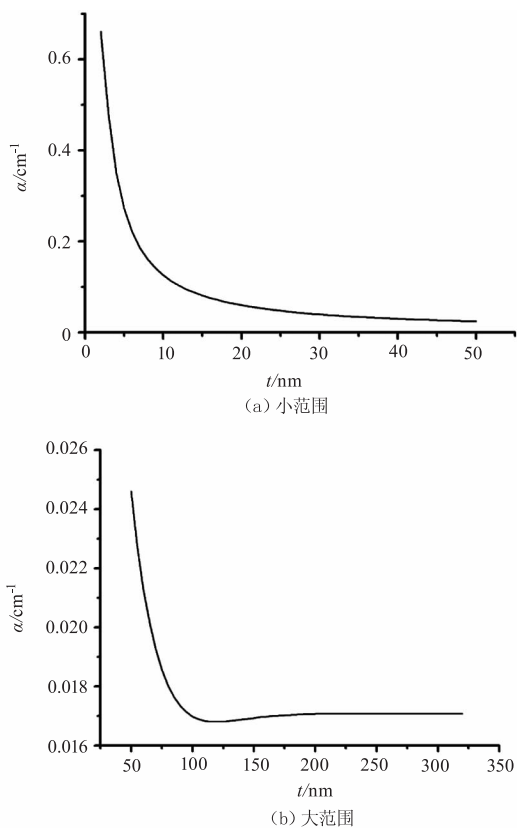
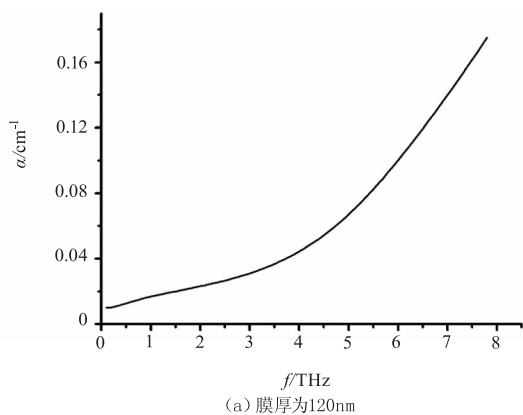
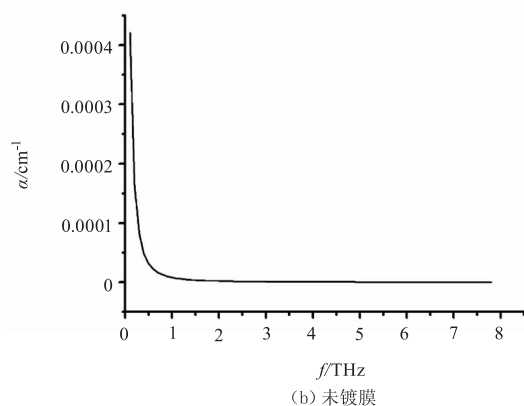


图2 1 mm厚硅板在1 THz处TM模损耗 α 随金属膜厚度的变化关系

硅板厚度为1 mm时,计算镀120 nm铜模时硅板和不镀膜时硅板TM模损耗 α 随太赫兹频率的变化关系,如图3(a)和(b)所示。



(a) 膜厚为120nm



(b) 未镀膜

图3 1 mm厚硅板TM模损耗 α 随频率的变化关系

由图可知随着太赫兹波频率的增加镀膜前后厚单介质板TM模的损耗 α 差异越大,由计算可知最大损耗 α 差异在7.8 THz时高达 1.295×10^6 倍。

为了知道厚单介质板TM模损耗差异随单介质板吸收系数的变化规律,计算对1 mm厚硅板1 THz频率处镀120 nm金属膜厚的TM模损耗比镀膜前TM模损耗的变化倍数 M 随硅等离子体振荡频率的变化规律,如图4所示。

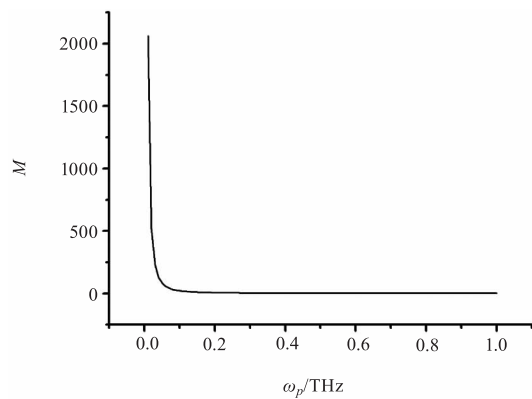


图4 1 mm厚单介质板镀120 nm厚金属膜前后在1 THz处TM模损耗变化倍数 M 随硅等离子体振荡频率 ω_p 的变化规律

随着硅掺杂程度的提高,硅的吸收损耗会增大,由图4知硅等离子体振荡频率从0.01~1 THz的变化范围内,镀膜后TM模损耗比镀膜前TM模损耗倍数从2063倍迅速下降。当硅等离子体振荡频率为1 THz左右时硅板吸收损耗已很大。在研究低吸收损耗厚单介质板波导时,金属膜对TM模损耗的影响相当剧烈。

3.2 金属膜对厚单介质板TM模模场分布的影响

当硅板厚1 mm,太赫兹频率为1 THz,膜厚分别为2 nm和120 nm时波导中TM模横磁场的归一化模场分布分别如图5(a)、(b)、(c)和(d)所示。

而未镀膜时,在1 THz处,1 mm厚单介质板内TM模的归一化模场分布如图6所示。

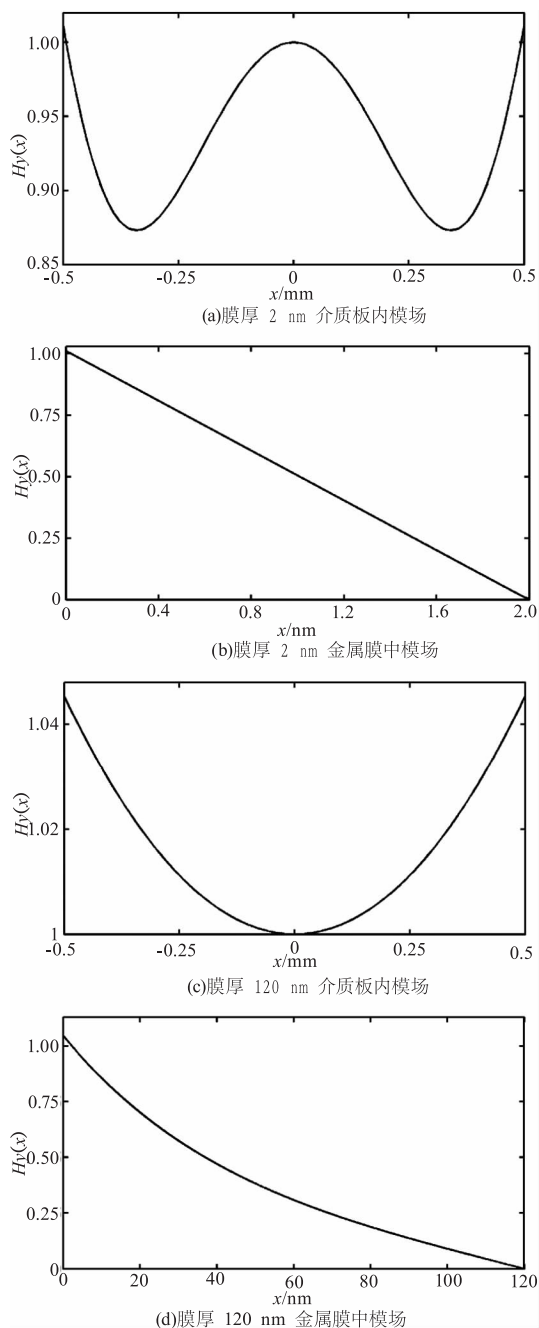


图5 板厚 1 mm,膜厚分别为 2 nm 和 120 nm 时在 1 THz 处波导内 TM 模横磁场归一化振幅分布

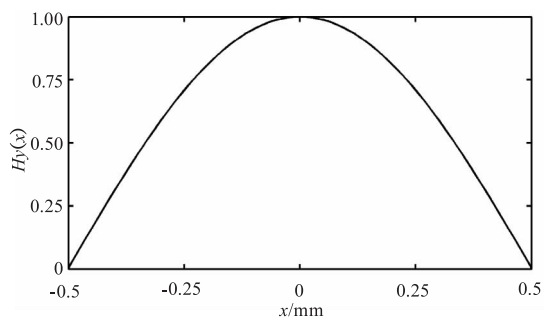


图6 未镀膜时 1 THz 处 1 mm 厚介质板内 TM 模横磁场归一化振幅分布

由图 5 图 6 可知镀金属膜后不但有部分模场进入了金属膜中,而且使厚单介质板内的模场分布有很大的变化。不镀膜时绝大部分模场分布在厚介质板中,其导光机制为全内反射(模式有效折射等于硅折射率);虽然在空气中模场有所延伸但振幅特别小,与介质内的模场比可以忽略,为倏逝波;并且此时介质内模场分布从中心到两边从 1 到 0 变化。而镀膜后介质内模场分布一直在 1 左右;值得指出的是进入金属薄膜的并不是倏逝波,而且振幅很大,在极薄的金属薄膜外侧降为 0,如果忽略金属薄膜厚度,这可以说是个突变;镀膜后空气中的场仍为倏逝波,可以忽略。

4 结 论

本文对太赫兹波在厚单介质板波导镀对称金属薄膜前后 TM 模的传输状况进行了详细的理论计算和对比。得到了在厚度为 1 mm 的硅板两侧镀相同厚度的铜膜时 TM 模太赫兹波在其内传输的损耗随铜膜厚度的变化规律,发现对较低吸收损耗的厚硅板镀膜后 TM 模的损耗比不镀膜时的损耗从 2063 倍到 81122 倍变化,损耗相差巨大。当镀膜厚度为损耗最低点 120 nm 时,发现 TM 模损耗随太赫兹波频率的增加差别越大,在 7.8 THz 处镀膜前后损耗变化高达 1.295×10^6 倍。对低吸收损耗厚单介质板,金属膜对 TM 模损耗的影响不可忽视。还研究了镀膜前后的 TM 模模场分布,发现镀膜前后厚单介质板内 TM 模模场分布显著不同。期望这些结果在太赫兹传感、太赫兹探测、光谱学和通信等各种太赫兹应用上有一定的用处。

参考文献:

- [1] Yun-Shik Lee. Principle of terahertz science and technology[M]. CUI Wanzhao, et al. translate. Beijing: National Defence Industry Press, 2012. (in Chinese)
Yun-Shik Lee. 太赫兹科学与技术原理[M]. 崔万照, 等译. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [2] HAN Yuan, ZHOU Yan, Ablet, et al. Application of terahertz technology in security field[J]. Modern scientific instruments, 2006, 2: 45 - 47. (in Chinese)
韩元, 周燕, 阿布来提, 等. 太赫兹技术在安全领域中的应用[J]. 现代科学仪器, 2006, 2: 45 - 47.
- [3] YAO Jianquan, LU Yang, ZHANG Baigang, et al. New research progress of THz radiation[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2005, 16(4): 503 - 510. (in Chinese)
姚建铨, 路洋, 张百钢, 等. THz 辐射的研究和应用新进展[J]. 光电子 · 激光, 2005, 16(4): 503 - 510.

- [4] ZHANG Zhang. Research progress of THz traveling wave tubes[J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(3): 250 – 257. (in Chinese)
张章. 太赫兹行波管的研究进展[J]. *激光与红外*, 2012, 42(3): 250 – 257.
- [5] WU Siqing, LIU Jingsong, WANG Shenglie, et al. Recent research progress of terahertz waves remote detection[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(12): 1325 – 1328. (in Chinese)
吴四清, 刘劲松, 汪盛烈, 等. 太赫兹波远程探测的最新研究进展[J]. *激光与红外*, 2013, 43(12): 1325 – 1328.
- [6] SONG Shufang. Development of the terahertz detection techniques[J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(12): 1367 – 1371. (in Chinese)
宋淑芳. 太赫兹波探测技术的研究进展[J]. *激光与红外*, 2012, 42(12): 1367 – 1371.
- [7] LI Yunda, LI Qi, DING Shenghui, et al. Recent development of terahertz computed tomography imaging[J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(12): 1372 – 1376. (in Chinese)
李运达, 李琦, 丁胜晖, 等. 太赫兹计算机辅助层析成像发展近况[J]. *激光与红外*, 2012, 42(12): 1372 – 1376.
- [8] LIU Diwei, ZHU Dajun, LIU Shenggang. Transmission characteristics of hollow dielectric film-coated waveguide for THz radiation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(4): 542 – 544. (in Chinese)
刘颀威, 祝大军, 刘盛纲. 介质镀膜空芯光纤在 THz 频段的传输特性[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(4): 542 – 544.
- [9] LU Dongmei, YAO Jianquan, ZHENG Yi, et al. Transmission characteristics of hollow metallic film-coated circular waveguide for THz radiation[J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(12): 1287 – 1289. (in Chinese)
陆东梅, 姚建铨, 郑义, 等. 太赫兹波在金属镀层空心圆波导中的传输特性[J]. *激光与红外*, 2007, 37(12): 1287 – 1289.
- [10] YANG Xin. Transmission characteristics of terahertz wave band in 2D square photonic crystal[J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(12): 1225 – 1228. (in Chinese)
闫昕. 太赫兹波段正方晶格二维光子晶体传输特性的研究[J]. *激光与红外*, 2008, 38(12): 1225 – 1228.
- [11] HUANG Wanwen, LI Baojun. Progress on terahertz waveguide devices[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(7): 11 – 17. (in Chinese)
黄婉文, 李宝军. 太赫兹波导器件研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, 43(7): 11 – 17.
- [12] Yosuke Minowa, Masaya Nagai, et al. Extremely thin metamaterial as slab waveguide at terahertz frequencies[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2011, 1(2): 441 – 449.
- [13] Yuanliang Zhang, Yao Zhang, and Baojun Li. Highly-efficient directional emission from photonic crystal waveguides for coupling of freely propagated terahertz waves into Si slab waveguides[J]. *Optics Express*, 2007, 15(15): 9281 – 9286.
- [14] D G Cooke, P Uhd Jepsen. Optical modulation of terahertz pulses in a parallel plate waveguide[J]. *Optics Express*, 2008, 16(19): 15123 – 15129.
- [15] Qiang Wu, Christopher A Werley, et al. Quantitative phase contrast imaging of THz electric fields in a dielectric waveguide[J]. *Optics Express*, 2009, 17(11): 9219 – 9225.
- [16] Ja-Yu Lu, Hao-Zai Chen, et al. Application of metal-clad antiresonant reflecting hollow waveguides to tunable terahertz notch filter[J]. *Optics Express*, 2011, 19(1): 162 – 167.
- [17] Michael Nagel, Astrid Marchewka, Heinrich Kurz. Low-index discontinuity terahertz waveguides[J]. *Optics Express*, 2006, 14(21): 9944 – 9954.
- [18] A Yariv. *Optical Electronics in Modern Communications* [M]. Oxford U. Press, Oxford, 2007.
- [19] XU Jingzhou, ZHANG Xicheng, et al. *Technology and application of terahertz science* [M]. Beijing: Peking University Press, 2007. (in Chinese)
许景周, 张希成, 等. *太赫兹科学技术与应用* [M]. 北京: 北京大学出版社, 2007.
- [20] M A Ordal, R J Bell, R W Alexander, et al. Optical properties of fourteen metals in the infrared and far infrared: Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Mo, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, V, and W[J]. *Applied Optics*, 1985, 24(24): 4494 – 4499.